بررسی هندسه و توزیع ضخامت در یک قالب جدید هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌های شکل *

مجید الیاسی[۱] پویا ذوقی پور[۲] محمد بخشی[۳] عبدالحمید گرجی[٤]

چکیده *قطعات لوله‌ای بدون درز با مقاطع گوناگون مانند لوله‌های پله‌ای استوانه‌هـای، مخروطـی و بـا مقطـع مربعـی عمومـاً بـا فرآینـد هیدروفرمینگ لوله تولید می‌شوند. در شکل‌دهی آن قطعات با این فرآیند، دستیابی به شکل‌هایی با گوشه‌های تیـز، مسـتلزم افـزایش فشـار است. این افزایش فشار، موجب نازک شدگی و پارگی احتمالی در گوشه قطعه خواهد شد. نویسندگان مقاله، طراحی یک قالب جدیدی را ارائه نموده‌اند که منجر به بهبود پرشدگی گوشه‌ی قالب در فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌های گردیده است. در قالب جدید، شکل‌دهی لوله، شامل دو مرحله‌ی بالج و نهایی است. در این مقاله، اثر مسیر فشار بر هندسه و توزیع ضخامت لوله در قالب جدید به‌طـور تجربی و شبیه سازی اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده، نشان داد که شکل هندسی مطلوب نهایی، وابسته به فشار مرحله‌ی بالج و نحوه‌ی اعمال فشار و تغذیه‌ی محوری در مرحله‌ی نهایی است و انتخاب مناسب این پارامترها بر روی شکل هندسی قطعه‌ی به‌دست آمده‌ی تأثیر دارد. همچنین نشان داده شد که در قالب جدید می‌توان به محصولی با توزیـع ضـخامت یکنواخـت در طـول دیواره دست یافت.*

واژه‌های کلیدی شکل‌دهی فلزات، هیدروفرمینگ لوله، لوله‌های پله‌ای، شبیه‌سازی اجزای محدود

Analysis of Geometry and Thickness Distribution in a New Hydroforming Die for Cylindrical Stepped Tubes

M. Elyasi P. Zoghipour M. Bakhshi A. H. Gorji

Abstract *Seamless tubular components with various cross sections, such as cylindrical, conical, and square cross section stepped tubes, are mainly produced in a tube hydroforming process. In forming those parts with this process, achieving shapes with sharp corners, requires an increase in the internal pressure. This may cause local thinning and bursting at the tube corners. The authors propose a new hydroforming die set in which the die corner filling is improved for cylindrical stepped tubes. In the new die, the forming of tube consists of two steps of bulging and final forming. In this paper, the effect of pressure path on thickness distribution and geometry of stepped tubes are studied by finite element simulation and experiment. The results in this paper illustrate that the bulging pressure and the pressure-axial feeding of the final forming stage influence the desired final geometry and that the proper selection of these parameters affects on the deformed part geometry. It is also shown that in the new die set it is possible to produce a sound part with uniform thickness distribution along the wall side.*

Key Words Tube Hydroforming, Stepped Tube, FE Simulation

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۸/۲/۲۸ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/٤/۱ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسؤول: استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

(۳) استاد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

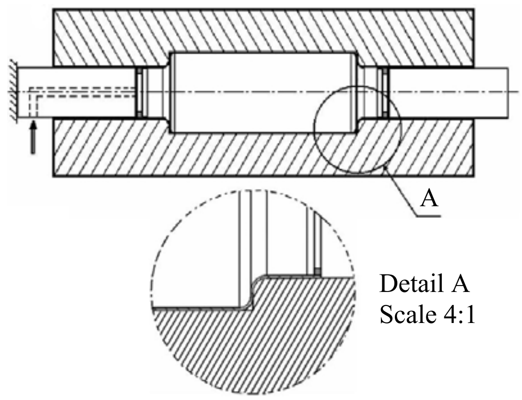
(٤) دانشجوی دکترا، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک

مقدمه

لوله‌های بدون درز یکپارچه، عموماً با روش هیدروفرمینگ تولید می‌شوند. این لوله‌ها برای کاربردهایی نظیر سیستم‌های انتقال سیال تحت فشار، سیستم‌های تهویه مطبوع و خطوط انتقال نفت و گاز به کار می‌روند. تولید لوله‌های پله‌ای با فرآیند هیدروفرمینگ در مقایسه با روش‌های سنتی تولید آن‌ها مانند فرآیندهای اسپینینگ و جوشکاری، دارای مزایای متعددی است. این مزایا شامل افزایش مقاومت به خوردگی به سبب عدم استفاده از عملیات جوشکاری،کاهش وزن، بهبود استحکام و سختی، کاهش هزینه ابزار، کاهش عملیات ثانویه، افزایش دقت و افزایش بهره‌وری استفاده از مواد است [1].

روش متداول شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای، استفاده از قالب‌های بسته‌ی هیدروفرمینگ می‌باشد. در شکل (۱)، شماتیک یک نوع از این قالب‌ها نشان داده شده است.

یکی از اهداف مهم در این نوع قالب‌ها، توزیع یکنواخت ضخامت در طول دیواره و حداقل کردن کاهش ضخامت قطعه می‌باشد [5-2].



شکل ۱ شماتیک قالب متداول هیدروفرمینگ لوله‌های پله‌ای استوانه‌ای[۵]

تولید لوله‌های پله‌ای در قالب‌های متداول هیدروفرمینگ دارای این محدودیت است که گوشه‌های تیز آن‌ها در انتهای فرآیند، به‌طور کامل شکل نمی‌گیرد. بعلاوه این گوشه‌ها نسبت به دیگر ناحیه‌های لوله، دارای ضخامت کم‌تری هستند. ایجاد گوشه‌های با توزیع ضخامت مناسب در این قطعات، یکی از موضوعات مهم در روش هیدروفرمینگ است که حداکثر فشار داخلی را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد.

برای دستیابی به گوشه‌های تیز در روش‌های متداول هیدروفرمینگ لوله، ممکن است به فشار داخلی بالایی نیاز باشد. فشارهای بالا ممکن است منجر به پاره شدن لوله گردد. استفاده از فشار پایین علاوه بر شکل نیافتن کامل گوشه‌های لوله، ممکن است باعث بوجود آمدن چروکیدگی شود [5-2].

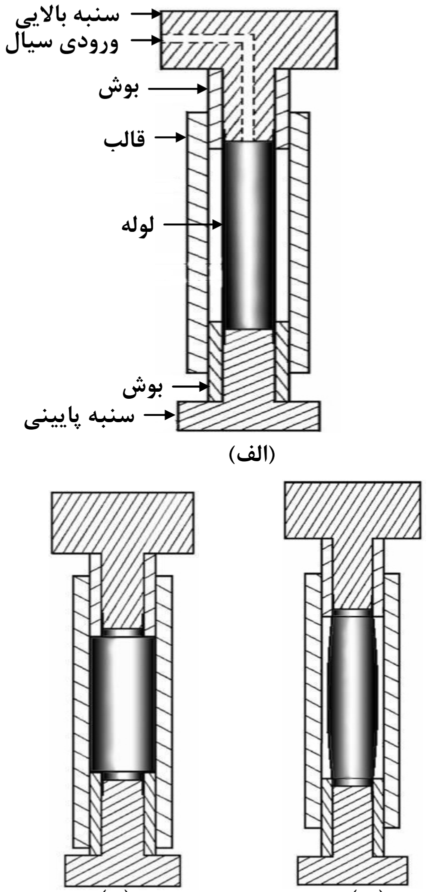
پژوهش‌های زیادی در زمینه‌ی پرشدگی گوشه‌ی قالب توسط محققان انجام شده است.

کریدلی و همکاران [۲] تغییرات ضخامت و پر شدگی گوشه‌ی قالب را برای لوله با ضرایب کرنش سختی و ضخامت‌های اولیه‌ی گوناگون، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش نمای کرنش سختی، می‌توان به قطعه با شعاع گوشه‌ی کوچک‌تر، دست یافت. آن‌ها همچنین نشان دادند که ضخامت لوله، رابطه‌ی مستقیم با فشار شکل‌دهی دارد؛ یعنی هر چه ضخامت لوله کم‌تر باشد، برای جلوگیری از پاره شدن آن، باید فشار نیز کاهش یابد. این محققان برای هر ضخامت اولیه لوله، یک حداکثر فشار به‌دست آوردند؛ اما در آن فشار، گوشه‌های قالب به‌طور کامل پر نگردید و نازک شدگی در نزدیکی محدوده گوشه به‌دست آمد.

هوانگ و چن [3] نحوه‌ی پر شدن یک قالب لوله پله‌ای با مقطع چهارگوش را با روش‌های تجربی، تحلیلی و اجزای محدود، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نیز نتیجه گرفتند که هر چه شعاع گوشه قالب کوچکتر گردد، به فشار بیشتری نیاز است تا لوله، گوشه‌های قالب را پر نماید و اگر فشار از یک مقدار بیشتر شود، منجر به پاره شدن لوله می‌شود. همچنین آنان ابزار

داشتند که هر چقدر اصطکاک میان لوله و دیواره قالب افـزایش یابـد، نـازک شـدگی بیشـتری در محـدوده‌ی گوشه‌ها رخ می‌دهد.

لــوح موســوی و همکــارانش [4,5] بــر روی پرشدگی گوشه‌های قالب در قطعات پلـه‌ای شـکل بـا مقطع چهارگوش و سه‌راهی مطالعاتی را انجـام دادنـد. آن‌ها سعی کردند تا با ایجاد یک مسیر فشـار نوسـانی بهینه، پر شدگی گوشـه قالـب را بهبـود ببخشـند. ایـن محققان به نتایج مطلوبی دست یافتند؛ اما در کار آن‌هـا، حتی با داشتن مسیر فشار نوسانی نیز گوشه‌های قالـب برای قطعات مورد نظر به‌طور کامل پر نگردید. از سوی دیگر، ایجاد مسیر فشار نوسـانی نسـبت بـه مسـیرهای ثابت یا خطی آن بسیار مشکل‌تر است.



شکل ۲ شماتیک مراحل شکل‌دهی لوله در قالب جدید، الف- مرحله قرارگیری ، ب- مرحله بالج، ج- مرحله شکل‌گیری نهایی [6]

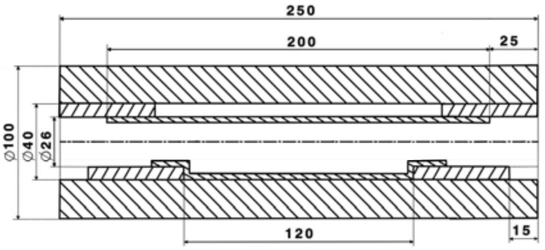
الیاسـی و همکـارانش [6-8] یـک قالـب جدیـد هیدروفرمینگ را برای لوله‌های پله‌ای استوانه‌های ارائـه کردند که در آن مشکل پر نشـدگی گوشـه قالـب‌هـای متداول رفع گردید. در این قالب جدیـد، مـی‌تـوان بـه محصولی با گوشه‌های کاملاً تیز رسید. پیچیـده نبـودن مکانیزم قالب و پایین بودن فشار شـکل‌دهـی از دیگـر مزایای قالب ارائه شده بود. شـکل (۲) شـماتیک ایـن قالب و مراحل پر شدن لوله را در آن نشان می‌دهد.

در این مقاله، اثر مسیر فشار بـر هندسـه و توزیـع ضـخامت قطعـات در مراحـل بـالج و پایـانی فرآینـد شکل‌دهی لوله‌های پله‌ای استوانه‌های در قالب جدید با روش‌های تجربی و اجزای محدود مورد مطالعـه قـرار گرفته است.

مشخصات هندسی قطعه و خواص مواد

شــکل (۳)، مشخصـــات هندســـی قالـــب جدیـــد هیدروفرمینگ و قطعه را قبل و بعد از شکل‌دهی نشـان می‌دهد. لوله دارای ضـخامت ۰/۵mm بـوده و مطـابق پارامترهای نشان داده شده، نسبت انبساط برابر است با ٪۵۳/۸۴ = ۱۰۰×(۲۶/(۲۶−۴۰)). لوله‌ی مـورد اسـتفاده از جنس فـولاد زنـگ نـزن SS316L بـوده و ترکیـب شیمیایی آن در جدول (۱) نشان داده شده است. بـرای تعیین خواص مکانیکی لوله، از آزمـایش بـالج اسـتفاده شـد. نمـودار تـنش- کـرنش بـه دسـت آمـده از ایـن آزمایش، درشکل (۴) نشان داده شده اسـت. همچنـین این منحنی با معادله زیر برازش شده است:

$$\overline{\sigma}=1650\overline{\varepsilon}^{0.58}[MPa] \qquad (1)$$



شکل ۳ هندسه قالب جدید هیدروفرمینگ و قطعه، ابعاد به میلی‌متر



شکل ٤ نمودار تنش-کرنش لوله فولادی زنگ نزن SS316L

جدول ۱ ترکیب شیمیایی لوله فولادی زنگ نزن SS316L

Element	%(wt)
C	0.022
Cr	17.45
Ni	12
Mo	2.01
Mn	0.88
Cu	0.41
Si	0.45
Fe	Base

شبیه‌سازی اجزای محدود

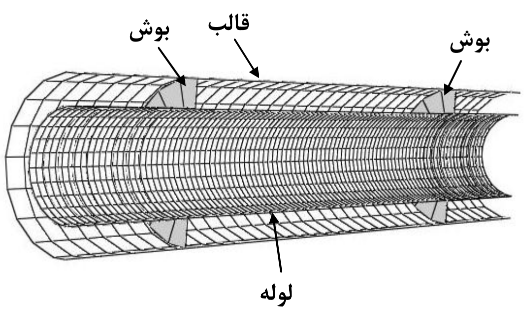
برای شبیه سازی فرآیند، از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS/Explicit 6.7 استفاده شده است. با توجه به تقارن هندسی، فقط نیمی از لوله و قالب، مدل شده است. مدل شبکه بندی شده در شکل (۵) نشان داده شده است. قالب به صورت صلب سه بعدی، مدل گردید و فقط سطوحی از قالب و بوش‌ها که در تماس با لوله قرار می‌گیرند، مدل‌سازی شدند. در شبیه سازی، ابزارها شامل قالب و بوش‌های دو طرف قالب، به‌صورت صلب مدل شدند و لوله به‌صورت شکل‌پذیر، مدل گردید. برای ایجاد مدل سه بعدی لوله در محیط نرم‌افزار، از المان پوسته‌ای (Shell) با روش دورانی (Revolve) حول محور تقارن استفاده شده است. برای مدل سازی لوله از ۱۰۰ المان در راستای محوری و ۲۰ المان در راستای محیطی استفاده گردید. ماده‌ی مدل شده، دارای خاصیت الاستیک پلاستیک بوده و از قانون هولومون تبعیت می‌کند و در مدل‌سازی، از ناهمسان‌گردی آن چشم‌پوشی شده است. برای مدل کردن اصطکاک بین سطوح در حال تماس لوله با بوش‌ها و قالب از قانون کولمب، استفاده شد.

بر اساس مراحل ذکر شده در مرجع [۹] ، مقدار ضریب اصطکاک کولمب میان سطوح قالب و قطعه کار در شبیه‌سازی برابر ۰/۰٦ در نظر گرفته شد.

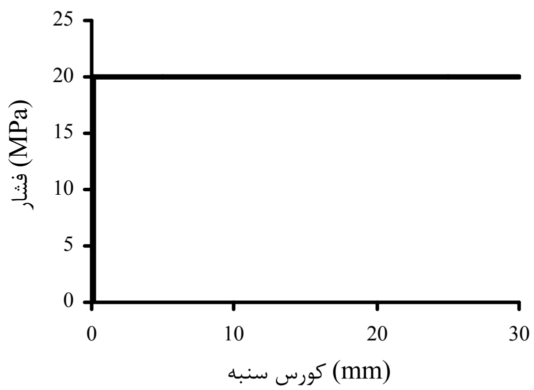
جهت تحلیل مراحل بالج و شکل‌گیری نهایی لوله که در شکل (۲) نشان داده شد، در نرم‌افزار دو گام تعریف شد. مقدار تغذیه‌ی محوری اعمالی در تحلیل اجزای محدود به‌صورت متقارن و از دو طرف به‌طور مساوی برابر ۱۵ mm و با نرخ پیشروی ۲۰ mm/min اعمال گردید. مسیر فشار استفاده شده از نوع ثابت بوده که یک نمونه آن در شکل (٦) نشان داده شده است. در آن شکل، مسیر قایم برای مرحله‌ی بالج آزاد است که در طی این مرحله، با ثابت ماندن سنبه‌ها، فشار افزایش می‌یابد. سپس با ثابت ماندن فشار و حرکت سنبه‌ها، مرحله‌ی نهایی در طول خط افقی صورت می‌گیرد و قطعه‌ی کار، شکل نهایی خود را به‌دست می آورد.

پنج منحنی فشار متفاوت ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲ MPa که در شکل (۷) نشان داده شده است، در شبیه سازی و بررسی تجربی مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۲)، پارامترهای اعمال شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

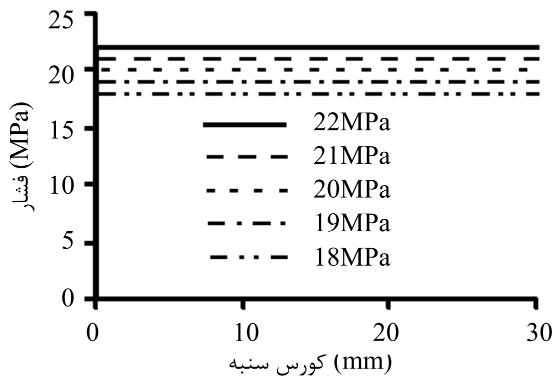
زمان محاسبات برای پردازش هر مدل اجزای محدود در حدود ٤ ساعت بود. سپس، خروجی‌های حاصل از حل عددی هر شبیه‌سازی، شامل هندسه‌ی تغییرشکل، تغییرات ضخامت، مؤلفه‌های کرنش و تنش در محیط نمایش نتایج برنامه، بررسی گردید.



شکل ۵ مدل شبکه بندی شده‌ی لوله و اجزای قالب در نرم‌افزار



شکل ٦ یک نمونه از مسیر فشار مورد استفاده در شبیه‌سازی و آزمایش های تجربی



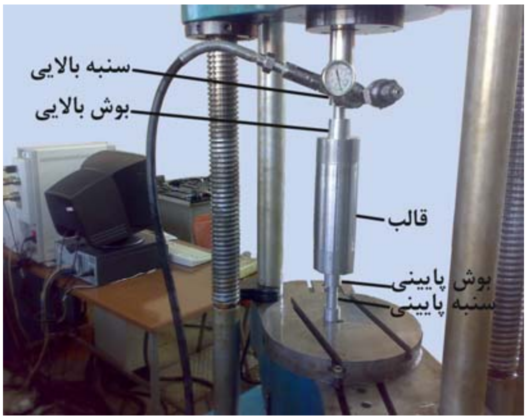
شکل۷ مسیرهای مختلف فشار استفاده شده در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی

جدول ۲ پارامترهای اعمال شده در شبیه سازی

مدول یانگ	نوع جزء	ضریب پواسان	تنش تسلیم	ضریب اصطکاک
۲۱۰GPa	S4R	۰/۳	۲٤۰MPa	۰/۰٦

مراحل آزمایشگاهی

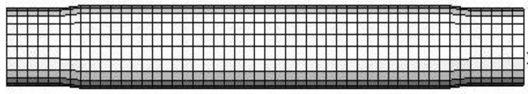
به منظور تأیید نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، آزمایش‌های تجربی انجام گرفت. تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. دستگاه استفاده شده در آزمایش‌ها، یک پرس اونیورسال هیدرولیکی DMG با ظرفیت ۶۰۰ kN می‌باشد. این پرس، توسط یک مجموعه‌ی کامپیوتری قابل کنترل و دارای امکانات کامل برای ثبت اطلاعات خروجی بوده است. سرعت پرس در تمامی آزمایش‌ها ۲۰ mm/min بوده است. همچنین در آزمایش‌ها از یک سیستم هیدرولیکی بعنوان دستگاه تولید فشار استفاده شد که قابلیت ایجاد فشار تا ۳۵ MPa را داشته و مقدار فشار کاری با یک شیر محدود کننده‌ی فشار، قابل کنترل بود. روغن استفاده شده در آزمایش‌ها، روغن هیدرولیک و با نام تجاری روغن هیدرولیک بابک ٦٨ بود که از آن برای اعمال فشار داخلی لوله و به عنوان روانکار نیز استفاده شد. جهت بررسی تکرارپذیری، هر آزمایش سه بار انجام شد. برای اندازه‌گیری ضخامت قطعات شکل داده شده از یک دستگاه ضخامت سنج اولتراسونیک با دقت ۰/۰۰۱mm استفاده شد.



شکل ۸ مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده

نتایج و بحث

فرآیند شکل‌دهی در مرحله‌ی بالج، برای فشارهای ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲MPa انجام گردید که در شکل های (۹) تا (۱۱) نتایج مربوط به فشارهای ۱۸، ۲۰ و ۲۲ MPa نشان داده شده است. با مقایسه‌ی این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد که افزایش فشار، باعث افزایش قطر ناحیه‌ی بالج شده است.

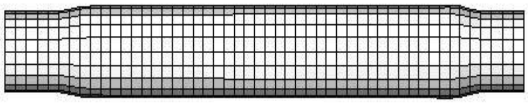


(الف)



(ب)

شکل ۹ قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۱۸ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

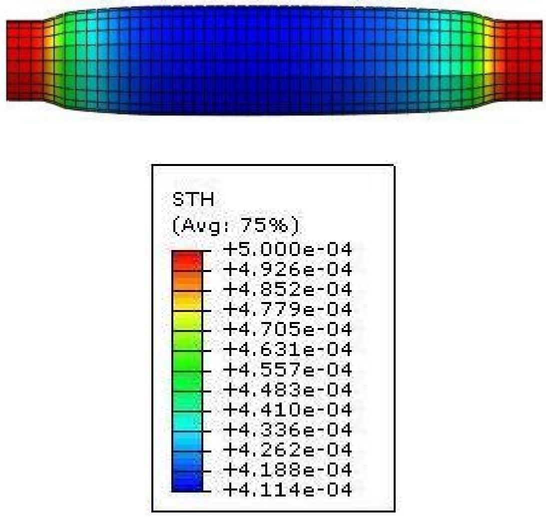


(الف)



(ب)

شکل ۱۰ قطعه شکل داده شده در مرحله بالج با فشار ۲۰ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی



(الف)



(ب)

شکل ۱۱ قطعه شکل داده شده در مرحله‌ی بالج با فشار ۲۲ MPa، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

در نتیجه شبیه سازی شکل (۱۱- الف) نشان داده شده است که در فشار ۲۲ MPa مقدار ضخامت قطعه در مرکز ناحیه بالج شده به ۰/٤۱۱٤ رسیده است؛ در این حالت، پارگی در لوله رخ داده است زیرا با توجه به جنس لوله، حدود ۱۸٪ کاهش ضخامت، به‌دست آمده است. همان گونه که از شکل پیداست، با افزایش فشار داخلی لوله، تنش‌های محیطی لوله افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که به دلیل عدم وجود تغذیه محوری در این مرحله، هیچ مؤلفه‌ی تنش محوری وجود ندارد و این باعث می‌شود که لوله در حالت کرنش صفحه‌ای در منطقه انبساط، تغییر شکل دهد. این تغییر شکل، به‌طور اساسی در منطقه‌ی بالج، یعنی منطقه آزاد بین دو بوش انجام می‌گیرد. افزایش فشار داخلی به ۲۲ MPa باعث شده که در مرکز لوله، پارگی رخ دهد. شکل (۱۱- ب) قطعه شکل یافته تجربی در این فشار را نشان می دهد. با ملاحظه این شکل، دیده می‌شود که در این فشار پارگی در لوله رخ داده است.

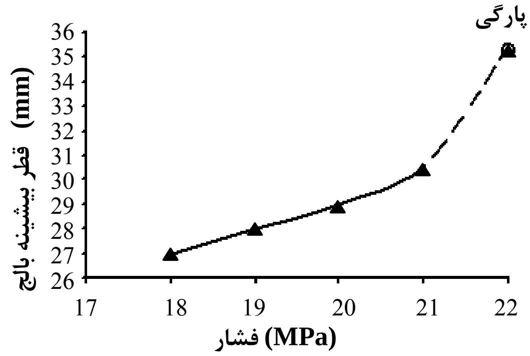
شکل (۱۲) منحنی تغییرات قطر بیشینه‌ی ناحیه‌ی بالج را بر حسب فشار داخلی سیال نشان می دهد. با ملاحظه‌ی این شکل، دیده می‌شود که افزایش فشار از ۱۸ MPa تا ۲۱ MPa به‌طور تقریباً خطی منجر به افزایش قطر ناحیه بالج می‌شود. در فشار ۲۲ MPa، در قطعه پارگی رخ داده است؛ از این رو، اندازه‌گیری دارای دقت نبوده و منحنی در محدوده ۲۱ تا ۲۲ MPa با خط چین نشان داده شده است.

پس از مرحله بالج، در مرحله‌ی نهایی با ثابت نگه داشتن فشار در همان سطح، فشار بالج برای هر مسیر معرفی شده در شکل (۷)، سنبه‌ها و بوش‌ها به‌طور همزمان حرکت می‌کنند. این مرحله برای فشارهای ۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱ MPa انجام شد اما برای فشار ۲۲ MPa به دلیل پارگی قطعه در مرحله قبلی بالج، انجام نگردید. شکل‌های (۱۳) تا (١٦) قطعات شکل داده شده در مراحل نهایی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل (۱۳-الف) دیده می‌شود، در نتیجه‌ی به‌دست آمده از شبیه‌سازی، چروک‌هایی ملاحظه می‌گردد. علت این امر آن است که جابه‌جایی

محوری با فشار داخلی MPa ۱۸ متناسب نیست؛ بعبارت دیگر، ماده تغذیه شده نمی‌تواند در راستای محیطی جریان یابد. بنابراین ماده در راستای محوری انباشته شده و چروک ایجاد می‌شود. شکل (۱۳- ب) نشان می‌دهد که نتیجه‌ی تجربی، نتیجه‌ی شبیه‌سازی را تایید می‌کند.

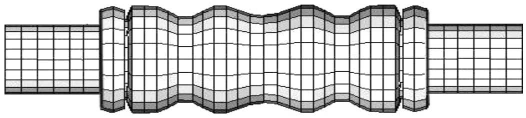
برای متناسب‌تر کردن تغذیه‌ی محوری با فشار داخلی، در شبیه‌سازی، مقدار فشار داخلی به MPa ۱۹ افزایش داده شد. شکل (۱٤- الف) نشان می‌دهد که این امر موجب کاهش تعداد و اندازه چروک‌ها گردیده است. شکل (۱٤- ب) نیز مؤید نتایج شبیه‌سازی بر اساس نتایج تجربی می‌باشد.



شکل ۱۲ منحنی تغییرات قطر بیشینه ناحیه بالج بر حسب فشار داخلی سیال

در فشار داخلی MPa ۲۰ مطابق شکل (۱۵) قطعه‌ی تولید شده بدون چروکیدگی و هر گونه پارگی می‌باشد و تمام مقدار ماده‌ای که در راستای محوری تغذیه شده است، به‌طور یکنواخت در راستای محیطی توزیع شده و قطعه کاملاً سالم است.

همان‌گونه که در شکل (۱۵) نشان داده شده، گوشه‌ی قطعه کاملاً پر نشده است. این امر می‌تواند بر اثر کم بودن سطح فشار انتخاب شده و یا کورس اعمالی باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، برای تولید قطعه‌ی سالم و با گوشه‌های کاملا تیز، فشار از MPa ۲۰ به MPa ۲۱ افزایش داده شد. مطابق شکل (۱٦) مشاهده شد که هم با شبیه‌سازی و هم با نتایج تجربی قطعه‌ی سالم و با گوشه‌های کاملاً تیز به‌دست آمد.

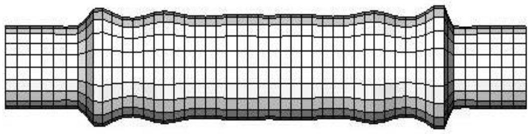


(الف)



(ب)

شکل ۱۳ قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار MPa ۱۸، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

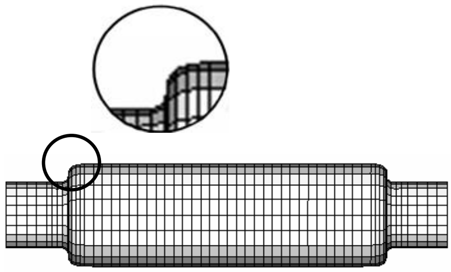


(الف)

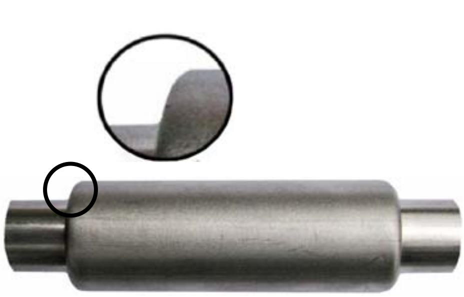


(ب)

شکل ۱٤ قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار MPa ۱۹، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

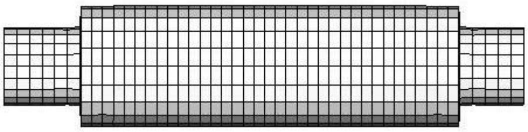


(الف)



(ب)

شکل ۱۵ قطعه شکل داده شده در مرحله نهایی با فشار MPa ۲۰ با گوشه گرد، الف- شبیه سازی، ب- تجربی



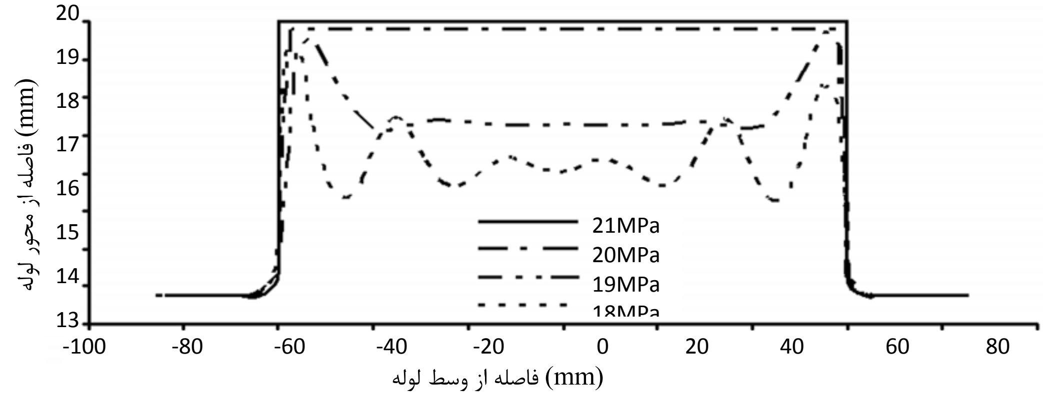
(الف)



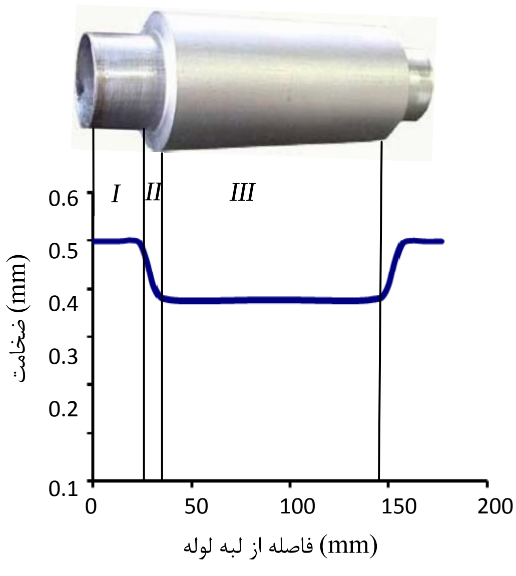
(ب)

شکل ۱۶ قطعه شکل داده شده در مرحله‌ی نهایی با فشار MPa ۲۱ با گوشه تیز، الف- شبیه سازی، ب- تجربی

شکل (۱۷) پروفیل سطح لوله را برحسب فشار در مرحله‌ی نهایی نشان می‌دهد که از شبیه‌سازی به‌دست آمده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، با افزایش فشار سطح لوله به دیواره‌ی قالب نزدیک شده و نهایتاً در فشار MPa ۲۱، به‌طور کامل و در سرتاسر لوله به آن چسبیده است. برای بررسی تغییرات ضخامت لوله، می‌توان لوله تغییر شکل یافته را به سه ناحیه تقسیم کرد. این نواحی به همراه یک منحنی نمونه توزیع ضخامت در شکل (۱۸) نشان داده شده است که در آن منطقه، I؛ ناحیه‌ی انتهای لوله، منطقه II؛ ناحیه‌ی گذار یا منطقه پیشانی بوش‌ها و منطقه‌ی III؛ ناحیه‌ی اصلی انبساط می باشد.

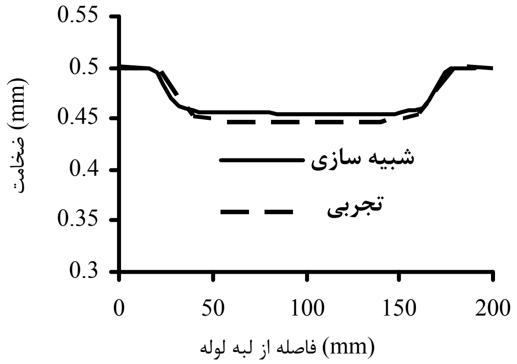


شکل ۱۷ پروفیل پر شدگی قالب در مرحله نهایی

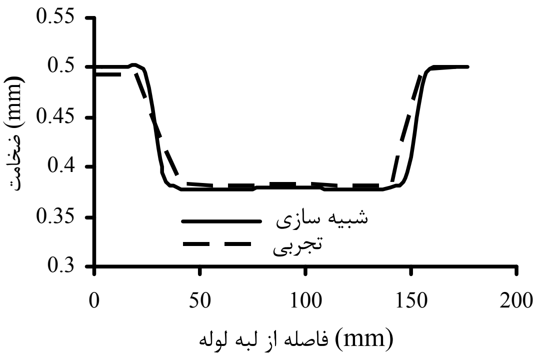


شکل ۱۸ نواحی مختلف منحنی توزیع ضخامت لوله

منحنی‌های توزیع ضخامت قطعات شکل داده شده برای فشار MPa ۲۱ در مرحله‌های بالج و نهایی به ترتیب در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی تطابق خوبی وجود دارد.



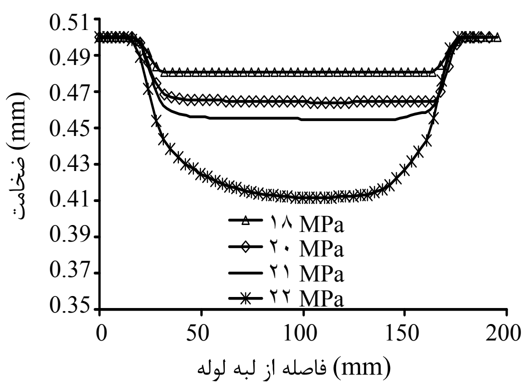
شکل۱۹ توزیع ضخامت لوله شکل داده شده در مرحله بالج برای فشار MPa ۲۱



شکل۲۰ توزیع ضخامت لوله‌ی شکل داده شده در مرحله‌ی نهایی برای فشار MPa ۲۱

شکل‌های (۲۱) و (۲۲) منحنی‌های توزیع ضخامت حاصل از شبیه‌سازی را برای فشارهای مختلف و به ترتیب برای مراحل بالج و نهایی نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که میانگین توزیع ضخامت برای مرحله‌ی بالج و مرحله‌ی نهایی با افزایش فشار داخلی کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که ضخامت ناحیه‌ی انبساط، کمتر شود. با توجه به شکل (۲۱) ملاحظه می‌گردد که در فشارهای ۱۸ و MPa ۲۰ توزیع ضخامت همواری در ناحیه‌ی انبساط به‌دست آمده است؛ اما با افزایش فشار از MPa ۱۸ به MPa ۲۰ میزان نازک شدگی بیشتر شده است. در فشار MPa ۲۲ اختلاف میزان نازک شدگی با دو فشار قبلی بسیار زیاد شده و توزیع ضخامت در ناحیه‌ی انبساط ناهموار شده است. همان‌گونه که قبلاً نیز توضیح داده شد، دلیل این امر این است. پس از فشار MPa ۲۱، نازک شدگی بیش از حد در قطعه رخ داده است و در نهایت در فشار MPa ۲۲ در قطعه پارگی رخ داده است.

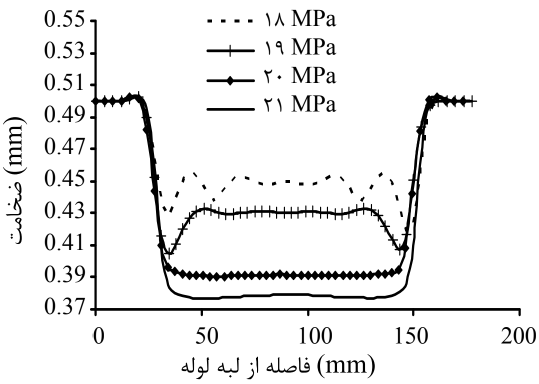
در مرحله‌ی نهایی، مطابق شکل (۲۲) دیده می‌شود که مقدار تغذیه‌ی محوری نیز بر توزیع ضخامت قطعات تأثیر گذاشته و تأثیر همزمان و متناسب فشار و تغذیه محوری است که باعث می‌گردد توزیع ضخامت همواری در ناحیه‌ی انبساط به‌دست آید. این توزیع هموار در فشارهای ۲۰ و MPa ۲۱ مشاهده می‌گردد. با مقایسه‌ی مقادیر نازک شدگی شکل‌های (۲۱) و (۲۲) در فشارهای یکسان، کاملاً واضح است که منحنی توزیع ضخامت قطعات در مرحله‌ی بالج هموارتر و یکنواخت‌تر از حالت نهایی است.



شکل ۲۱ منحنی‌های توزیع ضخامت در مرحله‌ی بالج برای فشارهای ۱۸، ۲۰، ۲۱ و MPa ۲۲، به‌دست آمده از شبیه‌سازی

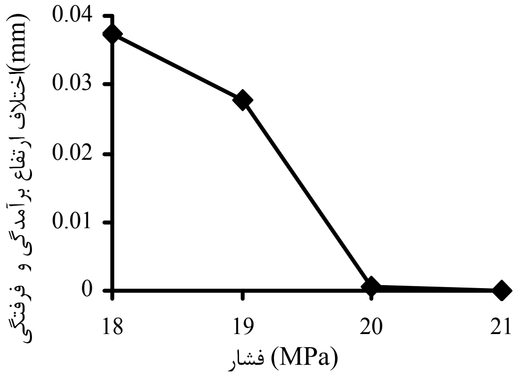
با مقایسه‌ی منحنی‌های توزیع ضخامت برای

فشـارهای ۲۰ و MPa ۲۱ در شـکل (۲۲) و قطعـات به‌دست آمده در این فشارها که به ترتیب در شکل های (۱۵) و (١٦) به‌دست آمده، دیده می‌شـود کـه قطعـات شکل داده شده در هر دو فشـار، سـالم و بـدون عیـب بوده و تنها اختلاف آن‌ها در گوشـه‌هـای قطعـه اسـت. درصورتی که گوشه تیز در قطعه مهم نباشد تولید قطعه با فشار MPa ۲۰ نسبت به فشار MPa ۲۱ بهتـر اسـت؛ زیرا کاهش ضخامت در آن کمتر می‌باشد. همچنـین در شکل (۲۲) دیده می‌شود که در فشـار MPa ۱۸ توزیـع ضخامت ناهمواری در مرحله‌ی نهایی بـه‌دسـت آمـده است کـه در ایـن نمـودار، بـه‌صـورت برآمـدگی‌هـا و فرورفتگی‌هایی دیـده مـی‌شـود. شـکل (۲۳) اخـتلاف ماکزیمم و مینیمم مقدار برآمدگی و فرورفتگی مربـوط به نمودار توزیع ضخامت را برای فشارهای تست شده در مرحله‌ی نهایی با شبیه‌سازی نشان می‌دهد.



شکل ۲۲ منحنی‌های توزیع ضخامت در مرحله‌ی نهایی برای فشارهای ۱۸، ۱۹، ۲۰ و MPa ۲۱، به‌دست آمده از شبیه‌سازی

با توجه به این شکل، می‌توان دریافت کـه بـا افـزایش سطح فشار داخلی در مرحله‌ی بالج و نهـایی، اخـتلاف ارتفاع بین برآمدگی و فرورفتگی کاهش پیدا می‌کنـد و رفته رفته شبیه به هم می‌شـوند. ایـن کـاهش اخـتلاف برآمدگی و فرورفتگـی در ناحیـه‌ی انبسـاط، بـه معنـی یکنواخت‌تر شدن توزیع ضخامت می‌باشد. همان گونـه که در این شـکل دیـده مـی‌شـود، در فشـارهای ۲۰ و MPa ۲۱ مقدار این اختلاف بسیار ناچیز شده و این به معنی حذف چروک خوردگی در سطح قطعه می‌باشد.



شکل ۲۳ اختلاف مقدار برآمدگی و فرو رفتگی در ناحیه‌ی انبساط

نتیجه‌گیری

۱- به‌دست آوردن شـکل هندسـی اولیـه‌ی مناسـب در مرحله‌ی بالج، تأثیر بسزایی در رسیدن بـه پروفیـل مطلوب نهایی از لوله در مرحله نهـایی دارد. شـکل هندسی مطلوب نهایی، وابسته بـه فشـار مرحلـه‌ی بالج و نحوه‌ی اعمال فشـار و تغذیـه در مرحلـه‌ی نهایی است و انتخـاب مناسـب ایـن پارامترهـا بـر شکل هندسی قطعه‌ی به‌دست آمده، تأثیر دارد.

۲- با اعمال مسیر فشار و تغذیـه محـوری متناسـب در قالب جدیـد، مـی‌تـوان بـه محصـولی سـالم و بـا گوشه‌های کاملا تیز دست یافت. به عبارت دیگـر، پـر شـدگی قالـب در ایـن حالـت، صـد در صـد می‌باشد.

۳- در بررسی تغییرات ضخامت لوله، ناحیه های لولـه تغییر شکل یافته به سه ناحیه تقسیم گردیـد. نشـان داده شد که مسیر فشار و تغذیـه محـوری انتخـاب شده در توزیع ضخامت این سه ناحیـه و بـه ویـژه ناحیه انبساط لوله، تأثیر بسزایی داشته و با انتخـاب مسیر متناسب می‌توان به توزیع ضخامت همـوار و

یکنواختی رسید. همچنین نشان داده شد درصورتی که بتوان از گوشه‌ی تیز قطعه چشم‌پوشی کرد، قطعه‌ی به‌دست آمده در فشار ۲۰ MPa نسبت به ۲۱ MPa ترجیح دارد؛ زیرا کاهش ضخامت در آن کمتر است. بعلاوه، با مقایسه منحنی‌های توزیع ضخامت به‌دست آمده درمراحل بالج و نهایی، می‌توان نتیجه گرفت که در فشارهای یکسان منحنی توزیع ضخامت قطعات در مرحله بالج هموارتر و یکنواخت تر از حالت نهایی است.

مراجع

1. Lang, L., Yuan S., Wang, X., Wang, Z.R., Fu, Z., Danckert, J., Nielsen, K.B.," A study on numerical simulation of hydroforming of aluminum alloy tube", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 377–388, (2004).
2. Kridli, G.T., Bao, L., Mallick, P.K., Tian, Y., "Investigation of thickness variation and corner filling in tube hydroforming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 133, pp. 287-296, (2003).
3. Hwang, Y.-M., Chen, W.-C., "Analysis of tube hydroforming in a square cross-section die", *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, pp. 1815-1833, (2005).
4. Loh-Mousavi, M., Mori, K., Hayashi, K., Bakhshi-Jooybari, M., "Improvement of filling die corners in box-shaped tube hydroforming by control of wrinkling", *Key Engineering Materials*, Vol.334, pp.461-467, (2007).
5. Loh-Mousavi, M., Bakhshi-Jooybari, M., Mori, K., Hayashi, K., "Improvement of formability in T-shape hydroforming of tubes by pulsating pressure", *Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture*, Vol. 222, pp. 1139-1146, (2008).
6. Elyasi, M., Gorji, A.H., Bakhshi-Jooybari, M., Alinejad, G., Hossinipor, S. J., Nourouzi, S., "A new die design for improvement of die corner filling in hydroforming of cylindrical stepped tubes", *Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture*, Vol. 30, pp. 3824-3830, (2009).
7. Elyasi, M., Gorji, A.H., Bakhshi-Jooybari, M., Alinejad, G., "A new die design for the hydroforming of stepped tubes", *In Advances in Materials and Processing Technology*, (Editors B.S. Yilbas and I. Alzahrani), (Manama, Kingdom of Bahrain) CD-ROM, (2008).
8. Bakhshi-Jooybari, M., Elyasi, M., Gorji, A., Alinejad, G., Hosseinipour, S.J., Nourouzi, S., "Investigation of die corner filling in hydroforming of cylindrical stepped tubes using finite element simulation and experiment", *Key Engineering Materials*, Vol. 410-411, pp. 335-343, (2009).
9. Ngaile, G., Jaeger, S., Altan, T., "Lubrication in tube hydroforming (THF) Part I. Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition

and expansion zones", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 108-115, (2004).